

Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



EP 1 209 458 A1

(11) EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(51) Int. Cl.: G01M 15/00

(43) Veröffentlichungstag:  
29.05.2002 Patentblatt 2002/22

(21) Anmeldenummer: 00710035.7

(22) Anmeldetag: 22.11.2000

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LU

MC NL PT SE TR

Benannte Erfindungsstaaten:  
AL LT LV MK RO SI

(71) Anmelder: Ford Global Technologies, Inc.,  
A subsidiary of Ford Motor Company  
Dearborn, Michigan 48126 (US)

(72) Erfinder:  
• Christen, Urs

52072 Aachen (DE)

• Jakober, Lukas Gregor  
8166 Niederwenningen (Zürh) (CH)

(74) Vertreter: Dörmer, Hans-Carsten, Dr.-Ing. et al  
Ford-Weite Aktiengesellschaft,  
Patentabteilung NWDRP,  
Henry-Ford-Strasse 1  
50723 Köln (DE)

(54) Verfahren zur Bestimmung des Geräuschpegels bei Betrieb einer Brennkraftmaschine

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung eines Geräuschindex für das Verbrennungsgeräusch einer Brennkraftmaschine. Dabei wird der Zylinderdruck gemessen und unter Einsatz einer Wavelet-Transformation gelteilt. Von der Wavelet-Transformation werden vorzugsweise nur diejenigen Koeffizienten (z.B.  $70_1$ ,  $71_1$ ,  $72_1$ ) weiterverarbeitet, die einer Frequenz des Signals aus einer vorgegebenen Bandbreite entsprechen. Aufgrund des Parseval-Theorems kann die Energie des ursprünglichen Signals aus den Koeffizienten der Wavelet-Transformation berechnet werden. Das Maß des Geräuschpegels wird vorzugsweise als Eingangsgröße für eine rückgekoppelte Regelung des Geräuschpegels unter Veränderung der Motorbetriebsparameter verwendet.

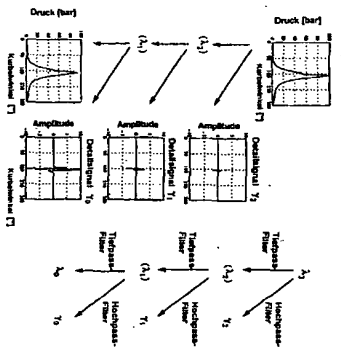


Fig. 1

EP 1 209 458 A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung des Geräuschpegels bei Betrieb einer Brennkraftmaschine, bei dem ein den Zylinderdruck repräsentierendes Signal gemessen und aus dem gemessenen Wert ein Maß für den Geräuschpegel der Brennkraftmaschine berechnet wird, sowie ein Verfahren zur rückgekoppelten Regelung des Geräuschpegels einer Brennkraftmaschine.

[0002] Wie aus Untersuchungen bekannt ist (M. F. Russell: Diesel engine noise: control at source, SAE paper No. 820238, 1982), hängt das beim Betrieb eines Dieselmotors abgestrahlte Geräusch in großem Ausmaß von dem Druckverlauf in den Zylindern ab. Grundsätzlich können dabei zwei Geräuschquellen im Motor unterschieden werden. Zum einen werden Geräusche von den äußeren Oberflächen des Motors abgestrahlt, wenn diese aufgrund des Verbrennungsprozesses vibrieren. Diese Art von Geräusch wird im Folgenden als "Verbrennungsgeräusch" bezeichnet. Hier von können sog. mechanische Geräusche unterschieden werden, welche von denselben Oberflächen abgestrahlt werden, wenn diese aufgrund von Stößen durch den Kolben, die Nockenmechanik, die Lager, die Ventile etc. dgl. vibrieren.

[0003] Das Verbrennungsgeräusch hängt sehr stark von der Form des Druckverlaufs in den Zylindern und dem entsprechenden Frequenzgehalt ab. Moderne Common-Rail Dieselmotoren ermöglichen mehrfache Kräfteinspritzungen pro Zyklus (z.B. Vor-, Haupt- und Nachspritzungen), durch die der Verbrennungsprozess und die Druckentwicklung beeinflusst werden können. Die Leistungssteuerung und die bei jeder Einspritzung eingespritzte Kraftstoffmenge sind gleichzeitig die Variablen, welche zum Zwecke der Geräuschkontrolle beeinflusst werden können.

[0004] Die Geräuschkontrolle wird dabei derzeit in wesentlichen in einem offenen Regelkreis vorgenommen, wodurch die Verwendung einer Vielzahl kalibrierter Parameter (Kennlinien) erforderlich wird. Dabei gibt es jedoch zahlreiche Parameter, durch die die Effektivität derartigen Datenmodelle über die Lebensdauer eines Motors beeinflusst wird. Selbstverständlich seien hier lediglich Variationen der Kraftstoffqualität und Alterungsprozesse der Einrichtungen zur Kraftstoffeinspritzung genannt. Um daher eine robuste und langzeitstabile Geräuschkontrolle zu erreichen, ist eine Rückkopplungskomponente erwünscht. Eine Voraussetzung für eine Rückkopplungsregelung ist jedoch die Verfügbarkeit eines Online-Maßes für den Geräuschpegel. Ein derartiger "Geräuschindex" wird bei bekannten Maßgrößen durch Filtern des Signals des Zylinderdrucks und anschließendes Berechnen des quadratischen Mittels (root mean square, RMS) erhalten (vgl. M. F. Russell, R. Haworth: Combustion noise from high speed direct injection Diesel engines, SAE paper No. 850973, 1985).

[0005] Im Zusammenhang mit der Analyse von Verbrennungsprozessen in Brennkraftmaschinen ist verschiedentlich die sog. Wavelet-Transformation verwendet worden. So beschreibt die JP 05 248 937 die Anwendung von Wavelets auf das Signal in einem Klopfsensor, in der JP 11 037 898 wird das Geräusch eines Motors mit einem Mischton aufgeschichtet und dann mittels Wavelets analysiert. Ein ähnlicher Aufbau wird in der US 5 832 802 beschrieben.

[0006] Weiterhin wird in Y. Yajima, K. Nakashima: New measuring technique of cylinder pressure spectrum and its application to combustion noise reduction - Time-frequency analysis of combustion excitation using wavelet transform analysis (SAE Review 19, p. 280-282, 1998) die Anwendung einer kontinuierlichen Wavelet-Transformation auf Zylinderdrucksignale eines Dieselmotors beschrieben. Die Transformation wird jedoch nur für die visuelle Inspektion eines zeitlich aufgelösten Frequenzspektrums verwendet. Für die Berechnung des Verbrennungsgeräusch-index wird die in Stand der Technik übliche strukturelle Dämpfung und sog. A-Gewichtung verwendet.

[0007] Schließlich wird bei T. Onsey: The use of wavelet transform and frames in NVH applications (SAE paper No. 951364, 1995) ein Überblick über die Wavelet-Theorie für NVH-Anwendungen (Geräusche, Vibrationen, Rauschen, Noise, Vibration, Harshness) gegeben, wobei der Schwerpunkt jedoch auf Vibrationsmessungen liegt.

[0008] Vor diesem Hintergrund war es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein verbessertes Verfahren zur Bestimmung eines Geräuschindex bezugsweise des Geräuschpegels beim Betrieb einer Brennkraftmaschine, insbesondere eines Dieselmotors, bereitzustellen, dahingehend, dass eine effiziente rückgekoppelte Geräuschkontrolle möglich wird.

[0009] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhaft Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen enthalten.

[0010] Bei dem Verfahren zur Bestimmung des Geräuschpegels einer Brennkraftmaschine, wie insbesondere eines Dieselmotors, wird ein dem Zylinderdruck entsprechendes Signal gemessen und einer Filterung unterzogen. Aus dem gefilterten Signal wird dann ein geeignetes Maß für den gesuchten Geräuschpegel berechnet. Erfindungsgemäß wird bei der Filterung des Signals eine Wavelet-Transformation des Signals durchgeführt, wobei die Bestimmung des Geräuschpegels anhand des Ergebnisses der Wavelet-Transformation erfolgt.

[0011] Wavelet-Transformationen liefern - ähnlich wie Fourier-Transformationen - den Frequenzinhalt eines Signals. Wavelet-Transformationen lokalisieren darüber hinaus das Signal gleichzeitig sowohl in der Zeit (oder in dem Ort) als auch der Frequenz. Die erfindungsgemäß vorgenommene Wavelet-Transformation hat den Vorteil, dass sie zum einen äquivalent zu einer Bandpassfilterung ist. Durch Berücksichtigung nur bestimmter Niveaus der Wavelet-Transformation kann somit der Frequenzinhalt des transformierten Signals gewählt werden. Zum anderen repräsentiert gemäß dem Parseval-Theorem eine Wavelet-Transformation mit orthogonalen Wavelets die Energie des Signals. Das quadratische

Mittel (RMS) kann daher aus dem transformierten Signal stat statt aus dem ursprünglichen Signal berechnet werden. Der erfindungsgemäße Einsatz der Wavelet-Transformation hat ferner den Vorteil, dass dieser weniger nachteilhaft als herkömmliche Filteroperationen ist und dass aus dem wavelet-transformierten Signal gleichzeitig zusätzliche Informationen für andere Anwendungen gewonnen werden können.

[0012] Die Wavelet-Transformation wird vorzugsweise als diskrete digitale Wavelet-Transformation implementiert. Für die Anwendung der Transformation im Rahmen der Geräuschanalyse haben sich insbesondere Coillet 2 Skalierungsfunktionen und Wellenfunktionen als geeignet erwiesen.

[0013] Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur rückgekoppelten Regelung des Geräuschpegels einer Brennkraftmaschine, insbesondere eines Dieselmotors, wobei auf den Geräuschpegel über eine Veränderung der Motorbetriebsparameter Einfluss genommen wird. Das Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass der als Eingangssignal für die Regelung dienende Geräuschpegel des Motors nach einem Verfahren der oben erläuterten Art bestimmt wird. Das heißt, dass der Zylinderdruck gemessen und mit Hilfe einer Wavelet-Transformation gefiltert wird.

[0014] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der Zeichnungen beispielhaft näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Wavelet-Transformation eines Zylinderdrucksignals;

Fig. 2 das Schema eines Bestimmungsgertes für einen Geräuschindex nach dem Stand der Technik;

Fig. 3 ein Amplituden-Diagramm von digitalen und analogen Verstärken des Systems nach Fig. 2;

Fig. 4 Frequenzbander einer Zwei-Niveau Coillet 2 Wavelet-Transformation;

Fig. 5 ein Amplituden-Diagramm zum Vergleich von herkömmlichen Filtern und von Wavelet-Filtern;

Fig. 6 eine schematische Darstellung eines Systems zur wavelet-basierenden Bestimmung des Verbrennungsgeräusches;

Fig. 7 eine Coillet 2 Skalierungsfunktion und Wavelet-Funktion;

Fig. 8 die Korrelation zwischen einem herkömmlich bestimmten und einem wavelet-basierten Geräuschindex;

Fig. 9 die bei einer Fourier-Transformation und bei einer Wavelet-Transformation verwendeten Basisfunktionen;

Fig. 10 Frequenzantworten in dem Filterpaar für die Coillet 2 Wavelet-Transformation und

Fig. 11 eine bauteilartige Struktur der Filter für die Wavelet-Transformation.

[0015] In Fig. 2 ist der Aufbau einer herkömmlichen Verbrennungsgeräusch-Messseinheit nach dem Stand der Technik schematisch dargestellt. Das Verbrennungsgeräusch kann aus dem Verlauf des Zylinderdrucks  $p$  bestimmt werden. Dieser wird in einer Kalibrierereinheit 1 des Systems von Fig. 2 auf ein bestimmtes Referenz-Schalldruckniveau bezogen. In einem anschließenden Filterblock 2 wird zunächst die sogenannte strukturelle Dämpfung berücksichtigt, bei der der Motorschall als ein Filter (eine Übertragungsfunktion) angesehen wird, welches die Dämpfung des durch den Verbrennungsprozess erzeugten Zylinderdrucksignals auf höhere Geräusche in einer gewissen Entfernung vom Motorblock beschreibt. Weiterhin kann die Empfindlichkeit des menschlichen Ohrs durch Anwendung eines zweiten Filters im Filterblock 2 nach der strukturellen Dämpfung berücksichtigt werden, was die sogenannte A-Gewichtung darstellt.

[0016] Aus dem von Filter 2 erhaltenen Spektrum kann ein Index für den Geräuschpegel durch Berechnung des quadratischen Mittels (RMS) abgeleitet werden. Dieses geschieht in Block 3. Im letzten Block 4 des Systems nach Fig. 2 findet eine Konversion in die Einheit dB(A) statt.

[0017] Fig. 3 zeigt ein Amplituden-Diagramm für den Filter 2 von Fig. 2 mit kombinierter Strukturdämpfung und A-Gewichtung. Die Abszissenfrequenz beträgt dabei 12 kHz.

[0018] Bei bekannten Verbrennungsgeräusch-Messgeräten wird für die Bestimmung des Verbrennungsgeräusches nur ein bestimmtes Frequenzband berücksichtigt. Die Form des Strukturdämpfungsfilters ist aus der Messung einer großen Anzahl von Lastwagenmotoren und Traktormotoren abgeleitet und repräsentiert die Dämpfung eines durchschnittlichen Verbrennungsmotors. In ähnlicher Weise spiegelt der A-Gewichtungsfaktor eine mittlere Empfindlichkeit des menschlichen Ohrs wider. Der bei den bekannten Verbrennungsgeräusch-Messgeräten ermittelte Geräuschpegel ist daher nicht als absolutes Maß für das Verbrennungsgeräusch, sondern eher als relativer Wert zu betrachten, der den Vergleich von Verbrennungsvarianten erlaubt.

[0019] Im Gegensatz zu dem in Fig. 2 dargestellten System wird erfindungsgemäß eine auf Wavelets basierende Berechnung des Geräuschindex aus vorgenommen. Eine detailliertere Beschreibung der Grundlagen der Wavelet-Transformation erfolgt weiter unten.

[0020] Die Wavelet-Transformation zerlegt ein Signal in ein Approximationssignal und mehrere Detailsignale. Die Transformation erfolgt durch wiederholtes Filtern des ursprünglichen Signals, was zu Detailsignalen mit bandbegrenzten Frequenzinhalten führt. Für die wavelet-basierte Geräuschmessung werden bevorzugt derartige Detailsignale eingesetzt, deren Frequenzbander denselben Bereich wie ein Filter in einem Geräuschmessgerät nach dem Stand der Technik abdecken.

[0021] Für eine zwei-Niveau Wavelet-Transformation unter Verwendung der Coillet 2 Wavelets erhält man auf diese Weise die in Fig. 4 dargestellten Frequenzbander. Hieraus ist erkennbar, dass die FIR-Filter (Finite Impulse Response), die für die Wavelet-Transformation angewendet werden, Tiefpass- und Hochpassfilter sind. Der Frequenzgehalt des Detailsignals wird durch die verschiedenen Hochfrequenzbander bestimmt, während das Frequenzgehalt des Approximationssignals durch das Frequenzband des Tiefpassfilters begrenzt ist. Das ursprüngliche Signal wird bei einer Frequenz  $f_0 = 14,6$  kHz abgetastet. Die vertikalen Linien zeigen die Nyquist-Frequenzen an, welche den Frequenzgehalt der entsprechenden Approximation und der Detailsignale begrenzen.

[0022] Um die Frequenzbander der Detailsignale mit der Form des herkömmlichen Filters zu vergleichen, wurden in Fig. 5 die Beiträge in einem entsprechenden Amplituden-Diagramm aufgetragen. Hieraus kann entnommen werden, dass zwei oder drei Detailsignale der Wavelet-Transformation (z. B.  $y_0, y_1, y_2$ ) beibehalten werden sollten, um denselben Frequenzbereich wie herkömmliche Filter abzudecken.

[0023] Das Parseval-Theorem stellt logische Beziehung zwischen der Wavelet-Transformation mit orthogonalen Wavelets und der Signalenergie her (zur Erläuterung der verwendeten Formelzeichen siehe die detaillierte Beschreibung der Grundlagen der Wavelet-Transformation weiter unten):

$$\int |f(x)|^2 dx = \sum_{l=-\infty}^{\infty} |y_{0,l}|^2 + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} |y_{j,k}|^2 \quad (1)$$

[0024] Auf diese Weise kann ein neuer, wavelet-basierender Geräuschindex  $N_{WVL}$  definiert werden als

$$N_{WVL} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{c}{n} \cdot \sqrt{\sum_k \sum_l |y_{j,k}|^2} \right) \quad (2)$$

wobei  $c$  ein Skalierungsfaktor zur Anpassung des absoluten Geräuschpegels und  $n$  die Anzahl der Abtastpunkte des ursprünglichen Signals ist.

[0025] Die Struktur dieses wavelet-basierten Verbrennungsgeräusch-Messverfahrens ist in Fig. 6 dargestellt. Wie bei dem herkömmlichen Verbrennungsgeräusch-Messverfahren setzt ein Kalibrierer 11 das eingehende Drucksignal  $p$  mit einem Referenzschalldruck in Beziehung. Da die Verstärkung der Wavelet-Transformation gleich eins ist, passt der Kalibrierer 11 auch das Niveau des resultierenden Signals entsprechend dem höchsten Niveau der herkömmlichen Filter an (ca. -90 dB). Dies erfolgt durch Multiplikation des Signals mit einem Faktor vor Anwendung der Wavelet-Transformation.

[0026] Nach der Wavelet-Transformation in Block 12 wird in Block 13 die Quadratwurzel der Summe der jeweiligen quadratischen Detailkoeffizienten berechnet, die dabei erhalten werden, durch die Länge des ursprünglichen Signals dividiert und schließlich in Block 14 in Dezibel [dB] konvertiert.

[0027] Für die oben erläuterte Wavelet-Transformation wurden Coillet 2 Wavelets gemäß Fig. 7 verwendet. Es können jedoch auch verschiedene andere Wavelets verwendet werden, wobei diese vorzugsweise (näherungsweise) symmetrisch und orthogonal sein sollten.

[0028] Beide oben beschriebenen Verbrennungsgeräusch-Messgeräte wurden mit denselben Drucksignalen getestet, die bei 2440 U/min Motorrev./min und 778 bar mittlerem induzierten Druck für verschiedene Zeitspannen und Mengen der Voreinspritzung aufgenommen wurden. Die Voreinspritzungsmengen liegen in einem Bereich von 1,5 mm<sup>3</sup> bis 2,5 mm<sup>3</sup> pro Takt, und die Einspritz-Zeitsteuerung liegt zwischen 6° bis 9,5° vor dem oberen Totpunkt. Die Abtastfrequenz  $f_s$  beträgt 14,6 kHz (entsprechend 1° Kurvenwinkel bei 2440 U/min).

[0029] Für den wavelet-basierten Geräuschindex wurden die ersten drei Detailniveaus der Wavelet-Transformation

betrachtet, Figur 8 zeigt eine ausgeprägte Korrelation zwischen dem erfindungsgemäßen (vertikale Achse) und dem herkömmlichen Index (horizontale Achse). Beide Indizes zeigen etwa dieselbe Sensitivität. Dieses Ergebnis zeigt, dass der wellenbasierte Gorfachindex eine gute Alternative zum herkömmlichen Gorfachindex darstellt.

[0030] Im Folgenden wird die Technik der Wavelet-Transformation detaillierter erläutert. Durch eine Wavelet-Transformation wird ein Signal in ein Approximationsignal und ein Detailsignal zerlegt. Das Approximationsignal enthält niederfrequente Information über das Ursprungssignal und stellt eine Art leuchtende Mittelwertbildung dar. Das Detailsignal enthält hochfrequente Information, die im Approximationsignal vernachlässigt wird. Figur 1 zeigt am Beispiel der Transformation eines Zylinderdrucksignals schematisch die bei einer Wavelet-Transformation ablaufenden Schritte.

[0031] Die Zerlegung eines Ursprungssignals kann bis zu jedem gewünschten Niveau vorangeht werden, indem das Approximationsignal das vorangegangene Niveau als das Startsignal verwendet und ein weiterer Schritt der Wavelet-Transformation angewendet wird. Dieses Vorgehen führt zu einem endgültigen Approximationsignal und mehreren Detailsignalen. Die resultierenden Signale liegen nach wie vor im Zeitbereich, es wird jedoch auch Information über den Frequenzinhalt offengelegt, da die in dem Detailsignal auf jedem Niveau enthaltenen Spektren bekannt sind. Aus diesem Grunde können zur selben Zeit Aussagen über das Verhalten des ursprünglichen Signals in Zeit und Frequenz gemacht werden.

[0032] Bei jedem Schritt der Transformation bleibt die Anzahl der Datenpunkte erhalten. Eine Hälfte der Datenpunkte speichert das Approximationsignal, die andere Hälfte das Detailsignal. Das gesamte Vorgehen ist verlustlos, und das ursprüngliche Signal kann immer durch Anwendung der inversen Wavelet-Transformation auf die Approximation und die Detailsignale wiederhergestellt werden.

[0033] Das Prinzip der Wavelet-Transformation kann am einfachsten erkannt werden durch einen Vergleich mit der Fourier-Transformation. Beide Transformationen expandieren das ursprüngliche Signal in eine Reihe von Basisfunktionen. Im Falle der Fourier-Transformation

$$f(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 x) + b_n \sin(n\omega_0 x)] \quad (3)$$

sind die Basisfunktionen Sinusfunktionen. Für die Wavelet-Transformation

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda_{0,k} \varphi(x-k) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \gamma_{j,k} \psi(2^j x - k) \quad (4)$$

sind die Basisfunktionen die Skalierungsfunktion  $\varphi$  und die Wavelet-Funktion  $\psi$ . Es gibt nicht nur ein Paar von Skalierungsfunktion und Wavelet-Funktionen, sondern sehr viele Familien von  $\varphi$ - und  $\psi$ -Paaren mit verschiedenen Eigenschaften, die sie für bestimmte Anwendungen jeweils besonders geeignet machen. Im Gegensatz zu Sinusfunktionen sind Skalierungsfunktionen und Wavelets "kleine Wellen", deren Energie in einem endlichen Intervall auf der x-Achse (Zeit oder Ort) konzentriert ist (Vgl. Figur 9). Dies ermöglicht es Zeit- und Frequenzanalysen gleichzeitig durchzuführen. Skalierungsfunktionen und Wavelets haben die folgenden Eigenschaften (Vgl. C.S. Burrus, R. A. Gopinath, H. Guo: Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms, A Primer, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999):

1. Die Wavelet-Systeme werden aus einer einzigen Skalierungsfunktion oder einem Wavelet durch Translation (das heißt Lokalisierung der Energie von  $\varphi$  oder  $\psi$  an verschiedenen Orten entlang der unabhängigen Achse durch Subtraktion von  $k$ ) und Skalierung (das heißt Kompression oder Dehnung der unabhängigen Achse durch Multiplikation von  $x$  mit  $2^j$ ) erzeugt. Die Skalierungsfunktionen sind gegeben durch

$$\varphi_0, k(x) = \varphi(x-k) \quad k \in \mathbb{Z} \quad (5)$$

Das "Mutter-Wavelet"  $\psi(x)$  wird durch die zweidimensionale Parametrisierung verschoben und skaliert

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k) \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (6)$$

wobei  $\mathbb{Z}$  die Menge aller ganzen Zahlen ist und der Faktor  $2^{j/2}$  eine konstante Normierung unabhängig von der Skala  $j$  gewährleistet.

2. Die meisten Wavelet-Systeme erfüllen die Multiresolutions-Bedingungen

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \sum_n \tilde{h}(n) \cdot 2^{-1/2} \varphi(2x-n), & n \in \mathbb{Z} \\ \psi(x) &= \sum_n \tilde{g}(n) \cdot 2^{-1/2} \varphi(2x-n), & n \in \mathbb{Z} \end{aligned} \quad (7)$$

Diese Bedingungen besagen, dass eine Skalierungsfunktion  $\varphi$  oder ein Wavelet  $\psi$  als eine gewichtete Summe von verschobenen Skalierungsfunktionen  $\varphi(2x)$  des nächsten Niveaus höherer Auflösung dargestellt werden können.  $\tilde{h}(n)$  und  $\tilde{g}(n)$  sind die sogenannten Gewichtung- oder Filterkoeffizienten.

[0034] Die Multiresolutions-Eigenschaft bedeutet, dass jedes Signal, welches durch eine gewichtete Summe von  $\langle x, \psi \rangle$  dargestellt werden kann, auch als eine gewichtete Summe von  $\varphi(2x - k)$  repräsentiert werden kann. Wenn die Basisfunktionen halb so breit sind und in halb so breiten Schritten verschoben werden, können sie feinere Details und daher eine größere Klasse von Signalen erfassen.

[0035] Das Ziel der Fourier- und der Wavelet-Transformationen besteht darin, Koeffizienten  $a_n$ ,  $b_n$ ,  $\lambda_{0,k}$  und  $\gamma_{j,k}$  der entstehenden Reihendarstellung zu finden, da diese unter Umständen nützlichere Information über das Signal bereitstellen können, als aus dem ursprünglichen Signal direkt ersichtlich wäre. Anders als die Fourier-Transformation bildet die diskrete Wavelet-Transformation ein eindimensionales abgelesenes Signal in ein zweidimensionales Feld von Koeffizienten ab, dessen zwei Dimensionen die "Zeit"  $k$  und die Skala ("Frequenz") sind. Die Approximationskoeffizienten  $\lambda$  enthalten alle verbleibenden niederfrequenten Informationen und haben daher nur einen Index, die Verschiebung  $k$  der Lokalisierung in der Zeit (oder im Ort). Gelegentlich wird die Notation  $\gamma(k)$  für  $\gamma_{j,k}$  und  $\lambda_0(k)$  für  $\lambda_{0,k}$  verwendet, um den Unterschied zwischen den zwei Indizes zu verdeutlichen.

[0036] Wenn die Wavelets oder Skalierungsfunktionen eine orthogonale Basis bilden:

$$\begin{aligned} \langle \varphi_{i,j}, \varphi_{i',j'} \rangle, \langle \psi_{i,j}, \varphi_{i',j'} \rangle &= \int \varphi_{i,j}(x) \cdot \varphi_{i',j'}(x) dx = 0 & i, j, k, l \in \mathbb{Z} \\ \langle \psi_{i,j}, \varphi_{i',j'} \rangle, \langle \psi_{i,j}, \psi_{i',j'} \rangle &= \int \psi_{i,j}(x) \cdot \psi_{i',j'}(x) dx = c \cdot \delta_{ij} \delta_{kl} & \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

können die Approximationskoeffizienten und Detailskoeffizienten durch Bestimmung der inneren Produkte berechnet werden

$$\begin{aligned} \lambda_{0,k} &= \langle f(x), \varphi_{0,k}(x) \rangle = \int f(x) \cdot \varphi_{0,k}(x) dx \\ \gamma_{j,k} &= \langle f(x), \psi_{j,k}(x) \rangle = \int f(x) \cdot \psi_{j,k}(x) dx \end{aligned} \quad (9)$$

In der Praxis erweist es sich allerdings nicht als effizient, die diskrete Wavelet-Transformation durch Bestimmung der inneren Produkte zu berechnen. Basierend auf Multiresolutions-Bedingungen kann gezeigt werden, dass nie mit Skalierungsfunktionen und Wavelet-Funktionen direkt gearbeitet werden muss. Unter Betrachtung von  $\lambda$  und  $\gamma$  als abgelesene Signale können digitale Filter gefunden werden, welche die Approximations- und Detailsignale auf verschiedenen Skalen berechnen. Auf diese Weise können die folgenden Gleichungen abgeleitet werden:

$$\lambda_j(k) = \sum_n \tilde{h}(-n) \cdot \lambda_{j+1}(2k-n)$$

$$\gamma_j(k) = \sum_n \tilde{g}(-n) \cdot \lambda_{j+1}(2k-n) \quad (10)$$

Die digitalen Filter werden durch die Koeffizienten  $\lambda_j(n)$  und  $\tilde{g}_j(n)$  beschrieben. Es handelt sich hierbei um FIR-Filter. Der Filter  $\tilde{g}_j$ , der zur Berechnung des Approximationssignals verwendet wird, ist ein Tiefpassfilter, während  $\tilde{h}_j$ , der zur Berechnung des Detailsignals verwendet wird, ein Hochpassfilter ist.

In Figur 10 sind die Frequenzantworten eines Parcos derartiger Filter dargestellt. Gemäß Gleichung (10) muss die Abtastrate der Signale nach der Filterung halbiert (down-sampled) werden, um die Signale  $\lambda_{j,k}$  und  $\gamma_{j,k}$  geeigneter Auflösung zu erhalten. Die Filterung und Abtastreduzierung kann an den Approximationssignalen in iterativer Weise vorgenommen werden, um die gesamte Wavelet-Zerlegung mit verschiedenen Skalen  $j$  und ein endgültiges Approximationssignal zu finden. Die resultierende baumartige Struktur von Filtern ist in Figur 11 gezeigt. In diesem Beispiel wird das ursprünglich abgetastete Signal  $\lambda_{0,k}$  in ein Approximationssignal  $\lambda_{0,k}$  und zwei Detailsignale  $\gamma_{1,k}$  und  $\gamma_{0,k}$  zerlegt.

#### Patentansprüche

- Verfahren zur Bestimmung des Geräuschpegels bei Betrieb einer Brennkraftmaschine, bei dem ein den Zylinderdruck (p) repräsentierendes Signal gemessen und gefiltert wird und aus dem gefilterten Wert ein Maß für den Geräuschpegel der Brennkraftmaschine berechnet wird, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Filterung eine Wavelet-Transformation durchgeführt wird und dass das Maß für den Geräuschpegel anhand des Ergebnisses der Wavelet-Transformation berechnet wird.
- Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass nur diejenigen Koeffizienten der Wavelet-Transformation für die Berechnung des Geräuschpegelmaßes verwendet werden, die Frequenzen einer vorgegebenen Bandbreite repräsentieren.
- Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Wavelet-Transformation eine diskrete digitale Wavelet-Transformation ist.
- Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Wavelet-Transformation mit Coletlet 2-Wellenfunktionen durchgeführt wird.
- Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass zwei oder drei Detail-koeffizienten der Wavelet-Transformation zur Berechnung des Maßes für den Geräuschpegel herangezogen werden.
- Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass zur Berechnung des Geräuschpegelmaßes die Quadratwurzel der Summe der quadrierten, bei der Wavelet-Transformation erhaltenen Detailkoeffizienten berechnet und durch die Länge des ursprünglichen Signals dividiert wird.
- Verfahren zur rückgekoppelten Regelung des Geräuschpegels einer Brennkraftmaschine mittels einer Veränderung der Motorbetriebsparameter, dadurch gekennzeichnet, dass ein Maß für den Geräuschpegel der Brennkraftmaschine in einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6 bestimmt und als lat-Größe für die Rückkopplungsregelung verwendet wird.

55

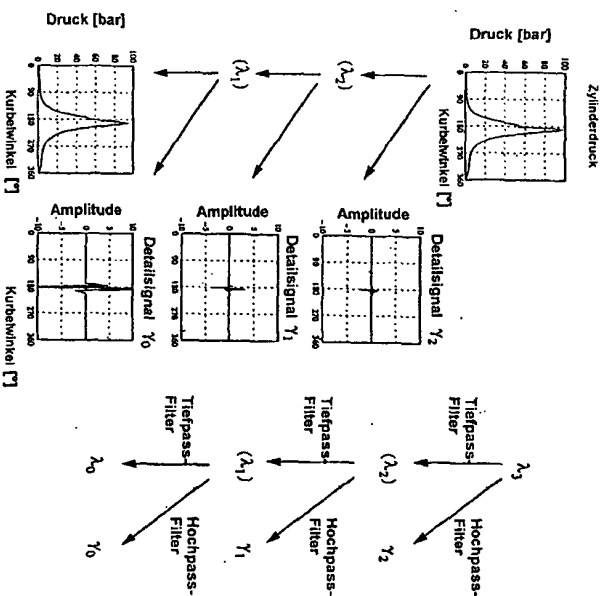


Fig. 1

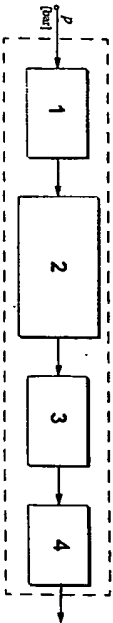


Fig. 2 (Stand der Technik)

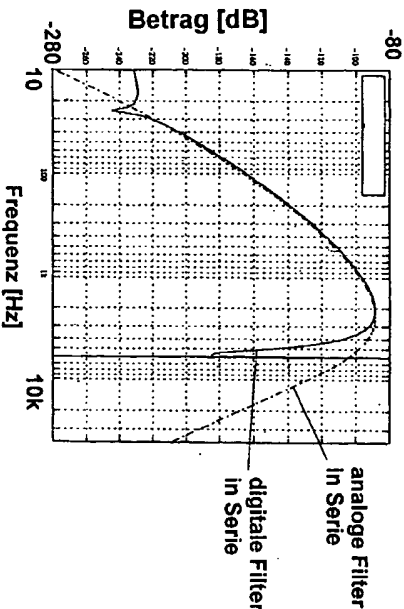


Fig. 3 (Stand der Technik)

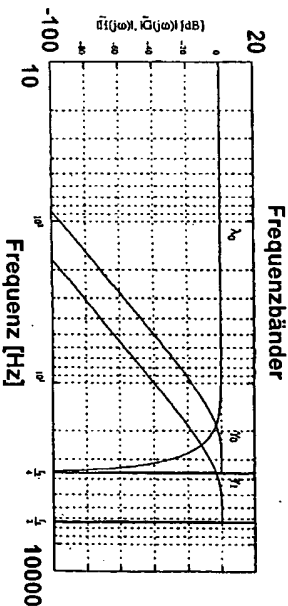


Fig. 4

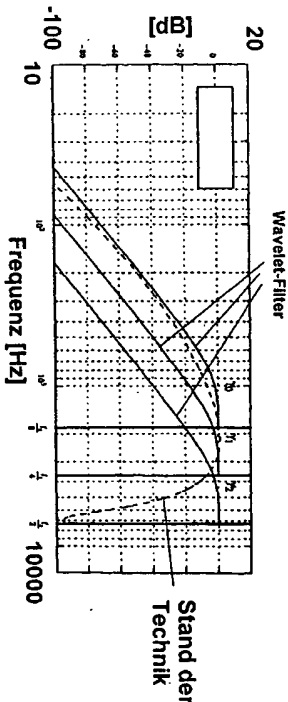


Fig. 5

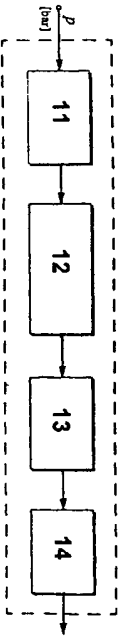


Fig. 6

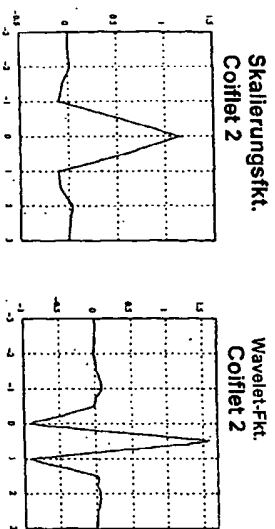


Fig. 7

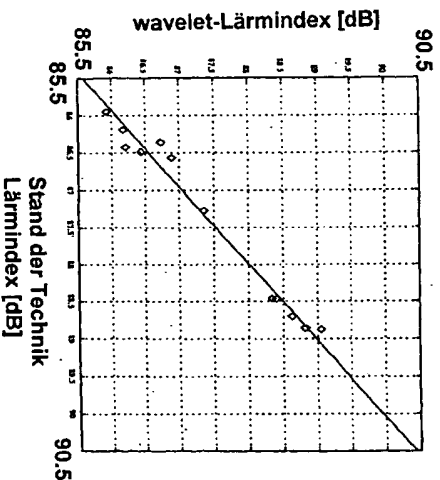


Fig. 8

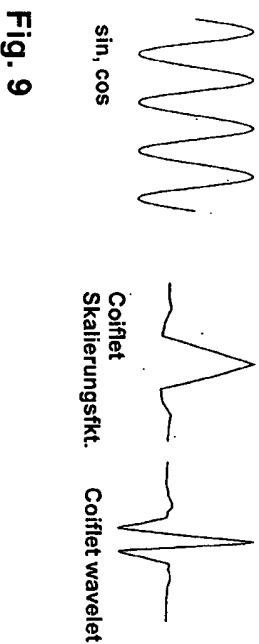


Fig. 9

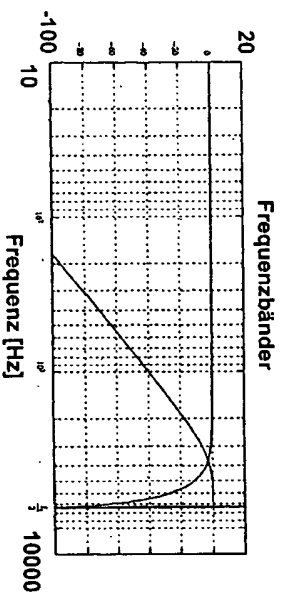


Fig. 10

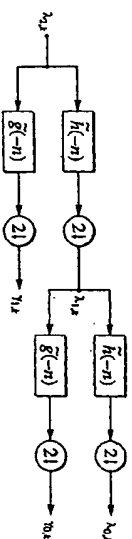


Fig. 11



Europäisches  
Patentamt  
EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 00 71 0035

Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Bereich Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (INCL.7)
X	KIKUCHI H ET AL.: "FAST NON-ORTHOGONAL WAVELET TRANSFORMS AND RECONSTRUCTION FOR DETONATION DETECTION" CHICAGO, MAY 3 - 6, 1993, NEW YORK, IEEE, US, Bd. -, 3. Mai 1993 (1993-05-03), Seiten 503-506, XP000410045 ISBN: 0-7803-1281-3 * das ganze Dokument *	1-3,7	601M15/00
Y	A. ISMAIL ET AL.: "Discrete wavelet transform: a tool in smoothing kinematic data?" JOURNAL OF BIOMECHANICS, Bd. 32, 1999, Seiten 317-321, XP000989416 UK * das ganze Dokument *	4,5	
A	US 5 784 300 A (ZINN BEN T. ET AL) 21. Juli 1998 (1998-07-21) * das ganze Dokument *	1	
A	FLOKORSKI M: "WAVELET DENOISING OF PARTIAL DISCHARGE IMAGES" XI'AN, CHINA, JUNE 21 - 26, 2000, NEW YORK, NY: IEEE, US, Bd. CONF. 6, 21. Juni 2000 (2000-06-21), Seiten 459-462, XP000997738 ISBN: 0-7803-5460-5 * das ganze Dokument *	1	601M TECHNISCHE SACHGEBIETE (INCL.7)

Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt

Bezeichnung	Abstraktion der Erfindung	Figur
DEN HAAG	22. Mai 2001	Zafripopulos, N

BAUELEMENTE DES GEMAUERTEN DOKUMENTS  
X: von besonderer Bedeutung sein betreffend  
Y: von besonderer Bedeutung in Verbindung mit  
A: von besonderer Bedeutung sein betreffend  
Q: von besonderer Bedeutung sein betreffend  
Z: von besonderer Bedeutung sein betreffend

ANMERKUNGEN  
E: das Dokument ist ein Dokument, das nach dem Anmeldungsdatum veröffentlicht worden ist  
I: das Dokument ist ein Dokument, das nach dem Anmeldungsdatum veröffentlicht worden ist  
L: das Dokument ist ein Dokument, das nach dem Anmeldungsdatum veröffentlicht worden ist  
D: das Dokument ist ein Dokument, das nach dem Anmeldungsdatum veröffentlicht worden ist

ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT  
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.

EP 00 71 0035

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentämter der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.  
Die Angaben sind nach dem Stand der Daten der Europäischen Patentämter an  
Dieses Anhang dienen nur zur Unterrichtung und erzeugen ohne Gewähr.

22-05-2001

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentämter	Datum der Veröffentlichung
US 5784300 A	21-07-1998	US 5719791 A	17-02-1998

Für weitere Einzelheiten zu diesem Anhang: siehe Artikel des Europäischen Patentrechts Nr. 1282